

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-22

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

EFECTOS DEL DESEQUILIBRIO DE TENSIÓN EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN CON CUÑAS MAGNÉTICAS

P.D. DONOLO*
UNRC
Argentina

C.M. PEZZANI
UNRC
Argentina

C.J. VERUCCHI
UNICEN
Argentina

G.R. BOSSIO
UNRC
Argentina

Resumen *– En este trabajo se analizan los efectos de la utilización de cuñas magnéticas en el estátor de un motor de inducción (MI) de baja potencia. Se evalúa de manera experimental el comportamiento de las corrientes, el factor de potencia, las pérdidas y el rendimiento del MI en condiciones ideales de suministro y para diferentes condiciones de carga. Además se analiza el efecto de las cuñas magnéticas cuando se presenta desequilibrio en la tensión alimentación. De los resultados experimentales obtenidos es posible notar que las cuñas magnéticas reducen el valor eficaz de las corrientes, incrementan el factor de potencia, disminuyen las pérdidas y aumentan el rendimiento del MI.*

Palabras clave: Motor de inducción – Cuñas magnéticas – Calidad de energía – Desequilibrio de tensión, – Rendimiento.

1 INTRODUCCIÓN

La conservación de la energía y la eficiencia energética del equipamiento final son temas prioritarios a nivel global [1]-[3]. En los últimos años se incrementaron los esfuerzos en este sentido para suavizar el impacto de la crisis energética y reducir las emisiones generadas [1]-[3].
El MI es el equipamiento final que consume la mayor cantidad de energía eléctrica en la industria [4]. Es por ello que en los últimos años se realizaron importantes avances para reducir sus pérdidas y mejorar su rendimiento [5][6]. El desarrollo de MI de mayor rendimiento permitió generar nuevas categorías de eficiencia y posibilitó el reemplazo de antiguos MI por modernos de mayor rendimiento [7].
Uno de los factores que limita el desarrollo de MI de mayor eficiencia es la utilización de ranuras abiertas para la disposición de las bobinas en el estátor. Las ranuras abiertas del estátor producen armónicos espaciales de alto orden en el flujo del entrehierro en los MI. Los armónicos de flujo generan pulsaciones en el par, aumento de las pérdidas adicionales y reducción del factor de potencia y del rendimiento [8] [9]. Para minimizar estos efectos, en MI de baja potencia se utilizan ranuras semicerradas. Sin embargo, este tipo de diseño no es viable en MI de gran potencia y se debe recurrir a otras alternativas como el uso de cuñas magnéticas para mejorar sus prestaciones [8]. Las cuñas magnéticas reducen las diferencias en la reluctancia del entrehierro originadas por las ranuras y, por ende, las componentes armónicas en el flujo magnético [9].
En [9] los autores reportan que con la implementación de cuñas magnéticas, se logró una reducción de aproximadamente el 40% en los flujos armónicos asociados a las frecuencias de ranura (en este caso armónicos 17 y 19).

* UNRC Ruta 36 km 601, Río Cuarto, Córdoba – pdonolo@ing.unrc.edu.ar

Además, el uso de cuñas magnéticas, permite reducir las corrientes de arranque, vacío y de plena carga de un MI e incrementar el rendimiento, el factor de potencia y el par de arranque [8][10]-[13].
En [14] se presenta una comparación sobre los efectos del empleo de cuñas magnéticas en un MI de 500 [kW] con cuñas de distintos valores de permeabilidad relativa. Los resultados demuestran que las cuñas magnéticas reducen el valor de la corriente de vacío, las pérdidas adicionales (asociadas a los flujos zig-zag) y las pérdidas en el núcleo magnético. Sin embargo, si se incrementa considerablemente el valor de la permeabilidad relativa de las cuñas pueden darse efectos negativos tales como una importante reducción del par de arranque y del par máximo del MI [14].
En [15], se analiza mediante el método de los Elementos Finitos las prestaciones de un MI con cuñas magnéticas de distintas dimensiones y permeabilidades relativas. El trabajo demuestra que si no se respetan ciertas condiciones geométricas en la colocación de las cuñas magnéticas, podrían originarse flujos de dispersión muy elevados en las ranuras lo que conduciría a una reducción del factor de potencia del MI.
En [16] se analizan las ventajas económicas de la utilización de cuñas magnéticas en MI. Los mayores niveles de rendimiento obtenidos en grandes MI pueden conducir a una reducción importante del consumo de energía. Los autores presentan un estudio con el ahorro energético potencial que el empleo de cuñas magnéticas permitiría en una planta con grandes MI [16].
En [17] se analiza el efecto de las cuñas magnéticas sobre la temperatura de los MI. Los autores muestran que los MI tienen mejor respuesta térmica cuando utiliza cuñas magnéticas [17]. La disminución del salto de temperatura se debe a que las cuñas magnéticas evitan altas concentraciones de densidades de flujo en los dientes del estátor y, por consiguiente, menores pérdidas magnéticas localizadas.
En los trabajos citados [8]-[17], se analizan las ventajas de la utilización de las cuñas magnéticas en condiciones ideales de suministro, sin embargo no se analiza el comportamiento de estos MI cuando la alimentación presenta problemas de calidad de energía.
Los problemas en la calidad de energía pueden condicionar el correcto funcionamiento de los MI. En particular, el desequilibrio de tensión es un problema común en el suministro industrial y conduce a mayores pérdidas que en condiciones ideales de suministro [18]. Asimismo, el desequilibrio de tensión produce una reducción en la potencia media y oscilaciones en la potencia a dos veces la frecuencia de alimentación [19].
La magnitud de estos efectos depende de la potencia y de la forma constructiva del MI [20][21]. En particular se encontró que los MI con rotor tipo jaula de ardillas con ranuras abiertas son más afectados por el desequilibrio de tensión que los MI con el rotor tipo jaula de ardillas con ranuras cerradas [20][21]. El hierro que cubre las barras de un rotor con ranuras cerradas no se encuentra saturado para bajos niveles de carga, dejando camino de baja reluctancia para el flujo de dispersión. Este fenómeno hace que los parámetros del MI varíen considerablemente respecto a los valores en condiciones nominales. El incremento de la reactancia de dispersión del rotor de ranuras cerradas trae asociado corrientes más pequeñas en las barras del rotor que en el caso de un MI con rotor de ranuras abiertas. Como consecuencia de ello, las corrientes de alta frecuencia son menores y el incremento de pérdidas es menor que en el caso de MI con rotor de jaula de ardillas con ranuras abiertas [20][21].
Las cuñas magnéticas en el estátor modifican los flujos zig-zag del circuito magnético haciendo que varíen las pérdidas adicionales como así también los parámetros del MI. La modificación de los parámetros del MI produce un cambio en el comportamiento del MI frente a problemas de calidad de energía.
En este trabajo se estudia el efecto de las cuñas magnéticas en el estátor del MI de baja potencia en condiciones ideales de alimentación y con desequilibrio de tensión. Se presentan los resultados de los ensayos en un MI de 3[kW], 380 [V], 50 [Hz] con ranuras semicerradas sobre la cual se pueden colocar cuñas de madera y cuñas magnéticas. Se analiza el comportamiento de las corrientes, el factor de potencia, las pérdidas y el rendimiento del MI con ambos tipos de cuña. En los resultados es posible notar que las cuñas magnéticas reducen el valor eficaz de las corrientes, incrementan el factor de potencia, disminuyen las pérdidas y aumentan el rendimiento de estos MI de baja potencia.

2 DEFINICIONES Y DESCRIPICIÓN DE LOS ENSAYOS

2.1 Factor de desequilibrio de tensión

En un sistema con tensiones trifásicas equilibradas los módulos de las tres tensiones son iguales y están desplazadas 120º eléctricos en el tiempo [22]. El desequilibrio de tensión es una perturbación en el sistema eléctrico en el que las tensiones de alimentación difieren en amplitud y/o ángulo de fase [22].

Si bien existen diferentes maneras de definir el nivel de desequilibrio de tensión del sistema una de las más utilizadas a nivel académico, y adoptada en este trabajo, es la propuesta en la norma IEC 61000-4-30. En esta norma se define el factor de desequilibrio de tensión como la relación entre el módulo de la componente fundamental de tensión de secuencia negativa $(|\mathbf{v}_2|)$ con respecto al módulo de la componente fundamental de la tensión de secuencia positiva $(|\mathbf{v}_1|)$ expresada en por ciento [23], es decir,

$$VUF = \frac{|\mathbf{v}_2|}{|\mathbf{v}_1|} \cdot 100 \,. \tag{1}$$

Las definiciones del nivel de desequilibrio se expresan generalmente para las tensiones de alimentación, sin embargo pueden ser igualmente aplicadas para obtener los factores de desequilibrio de corriente.

2.2 Banco de ensayos

El banco utilizado para los ensayos se presenta en la figura 1. El banco de ensayos consta de una fuente trifásica programable que permite sintetizar diferentes formas de onda de amplitud y frecuencia programables. Mediante esta fuente es posible generar diferentes condiciones de alimentación, como la alimentación ideal y diferentes niveles de desequilibrio de tensión.

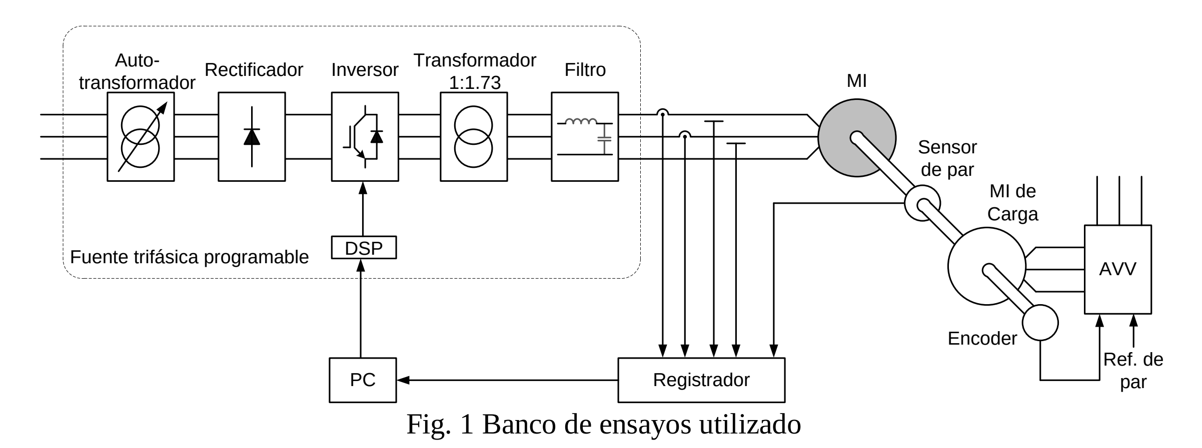


Fig. 1 Banco de ensayos utilizado

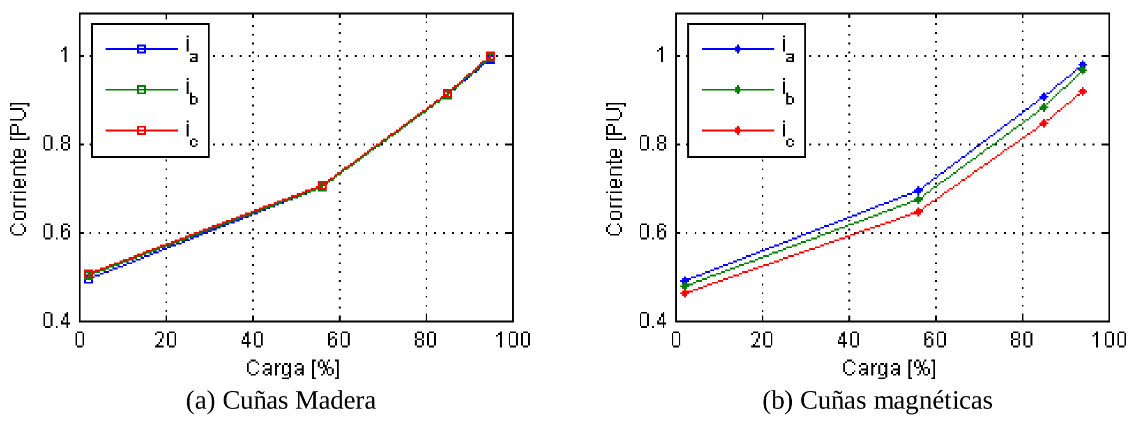
La fuente trifásica está compuesta por un autotransformador que permite ajustar el nivel de tensión de entrada. Luego un rectificador trifásico permite pasar de trifásica a continua y finalmente un inversor controlado mediante un procesador digital de señales (DSP) que permite pasar la continua nuevamente a alterna pero de frecuencia, amplitud y formas de onda programadas.
Un filtro pasivo de 1kHz a la salida del transformador permite eliminar la mayoría de las componentes asociadas a la conmutación (10 [kHz]) dejando solamente la componente fundamental.
Para analizar el efecto de las cuñas magnéticas se utilizó un MI de 3[kW], 380 [V], 6,25 [A], 50 [Hz], un par de polos y carcasa 100. Si bien este tipo de MI posee ranuras semicerradas, el factor de aprovechamiento de ranuras es bajo lo que permite la colocación de las cuñas magnéticas o de madera para cerrar completamente las ranuras [2]. Las cuñas de madera no interactúan con el flujo en el entrehierro pero proporcionan soporte mecánico para las bobinas del estátor. Por lo tanto, el uso de las cuñas de madera no modifican el comportamiento del MI respecto de su operación sin cuñas.
La figura 1 muestra también que el MI a ensayar está acoplado mecánicamente con otro MI que es controlado por un accionamiento comercial con control de par (AVV), que funciona como carga. El MI de carga actúa como generador disipando la energía sobre una carga resistiva. La referencia de par se ajusta externamente a los valores requeridos para cada ensayo.
La medición de par y velocidad se realizó mediante un sensor de par Staiger Mohilo de 100 [Nm] de fondo de escala. Las variables eléctricas se adquirieron mediante un registrador oscilográfico marca Yokogawa de cuatro canales (3.2 [s], 40 [kS]). Se midieron dos corrientes de fase y dos tensiones de línea. La corriente y tensión restantes se obtuvieron a partir de las medidas debido a que en el MI no existe conexión de neutro. Finalmente los datos adquiridos se procesaron en una computadora personal.

3 EFECTO DE LAS CUÑAS MAGNÉTICAS EN CONDICIONES IDEALES DE SUMINISTRO

En esta sección se analiza el efecto de las cuñas magnéticas en las corrientes, el factor de potencia, las pérdidas y el rendimiento del MI en condiciones ideales de suministro y diferentes condiciones de carga.

3.1 Variaciones de las corrientes eficaces de línea por la utilización de cuñas magnéticas

La figura 2 muestra los resultados obtenidos de las corrientes eficaces de línea para diferentes condiciones de carga. En la parte (a) de la figura se ven los resultados obtenidos utilizando cuñas de madera mientras que en la parte (b) se ven los resultados obtenidos con las cuñas magnéticas.



(a) Cuñas Madera (b) Cuñas magnéticas

Fig. 2 Corrientes eficaces de línea del MI para diferentes condiciones de carga

Comparando la parte (a) y (b) de la figura 2 es posible notar que la utilización de las cuñas magnéticas reduce las corrientes del MI para cualquier condición de operación. Por ejemplo, para el MI operando en vacío la mayor de las corrientes utilizando cuñas magnéticas es de 3,05 [A] (0,488 PU) y la menor de las corrientes utilizando las cuñas de madera es 3,11 [A] (0,4976 PU). Del mismo modo, operando en condiciones cercanas a plena carga la mayor de las corrientes utilizando cuñas magnéticas es de 6,14 [A] (0,9824 PU) y la menor de las corrientes utilizando las cuñas de madera es 6,21 [A] (0,9936 PU).
Analizando la figura 2 es posible notar también que la utilización de las cuñas magnéticas condujo a un mayor desequilibrio de corrientes que con las cuñas de madera. Sin embargo, este comportamiento puede ser particular del MI ensayado debido a asimetrías propias de las cuñas magnéticas utilizadas y su colocación en las ranuras.

3.2 Variaciones en el factor de potencia por la utilización de cuñas magnéticas

El factor de potencia es otra de las variables que según la bibliografía mejora con el uso de cuñas magnéticas [8][10]-[13]. La figura 3 muestra el comportamiento del factor de potencia para diferentes estados de carga con la utilización de las cuñas de madera y las cuñas magnéticas.

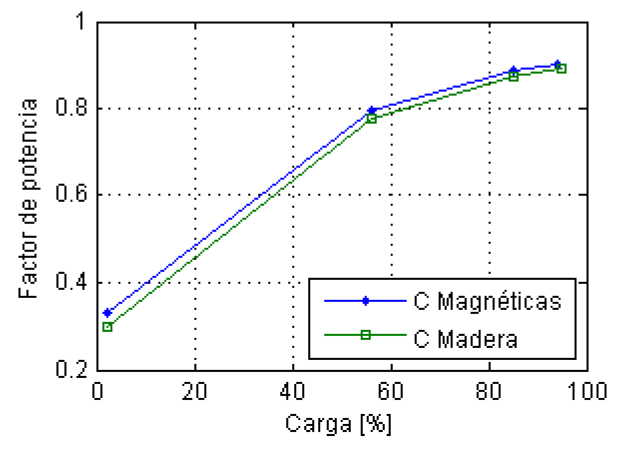
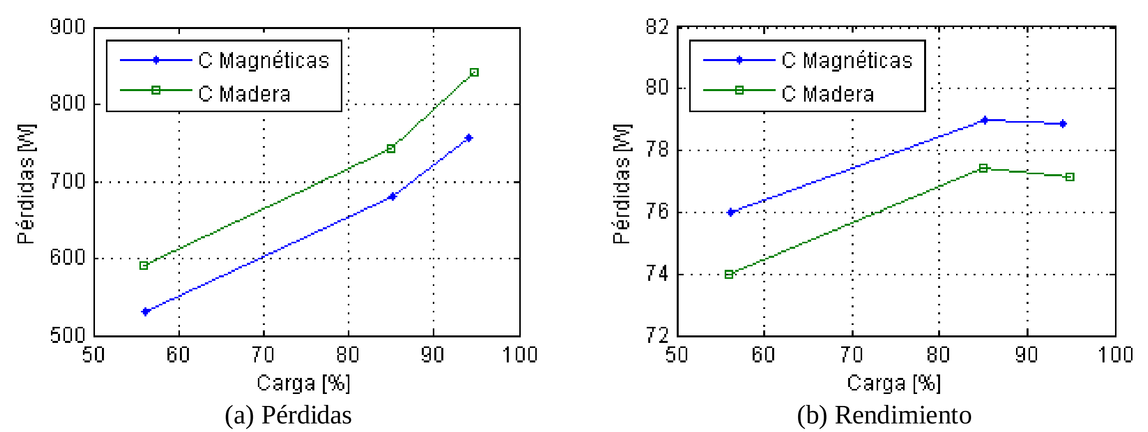


Fig. 3 Factor de potencia del MI en diferentes condiciones de carga

En la figura 3 se ve que el factor de potencia es mayor con el uso de cuñas magnéticas para todos los estados de carga. Sin embargo, las mayores diferencias se observan para estados de carga bajos. En operación cercana a plena carga la diferencia en el factor de potencia es despreciable.

3.3 Variaciones en las pérdidas y en el rendimiento por la utilización de cuñas magnéticas

La figura 4 (a) muestra los resultados obtenidos del comportamiento de las pérdidas en el MI con la utilización de las cuñas de madera y con las cuñas magnéticas. Es posible notar que el incremento en la carga conduce a mayores pérdidas en ambos casos, sin embargo para todo el rango de operación normal de un MI, entre el 50% y el 100% de carga, el uso de cuñas magnéticas reduce considerablemente las pérdidas del MI. Con el MI operando al 95% de carga las pérdidas del MI con las cuñas de madera son aproximadamente 840 [W]. Con la utilización de las cuñas magnéticas las pérdidas se reducen a aproximadamente 760 [W], es decir, aproximadamente 10% menos que con las cuñas de madera.
Esta diferencia en las pérdidas se manifiesta en el rendimiento del MI. La figura 4 (b) muestra el rendimiento del MI con la utilización de las cuñas de madera y con las magnéticas. Se ve que el MI con cualquiera de las cuñas presenta mayor rendimiento cuando opera entre el 80-90% de carga que cuando lo hace a plena carga. En la figura se ve también que el MI con las cuñas magnéticas tiene un rendimiento superior al que se obtiene cuando utiliza las cuñas de madera para todo el rango de operación.
El rango de mejora es de aproximadamente 2% a media carga y 1,6% a plena carga.



(a) Pérdidas (b) Rendimiento
Fig. 4 Pérdidas y rendimiento del MI en diferentes condiciones de carga

4 EFECTO DE LAS CUÑAS MAGNÉTICAS CON ALIMENTACIÓN DESEQUILIBRADA

El desequilibrio de tensión es una perturbación en el sistema eléctrico que produce corrientes desequilibradas en las bobinas, incremento en las pérdidas, reducción en el rendimiento y puede conducir a variaciones en la temperatura. La magnitud de estos efectos depende en gran medida del tipo de MI y de sus características constructivas. Por lo tanto, es interesante conocer cómo afecta el uso de cuñas magnéticas en el estátor del MI cuando las tensiones están desequilibradas.

4.1 Desequilibrio de tensión y su efecto en las corrientes

Analizando las corrientes del MI con el método de las componentes simétricas es posible observar cómo el desequilibrio de tensión (VUF) produce un desequilibrio importante en las corrientes (CUF). La figura 5 muestra cómo varía el desequilibrio de corriente en función del desequilibrio de tensión con la utilización de cuñas de madera y con cuñas magnéticas operando a plena carga.

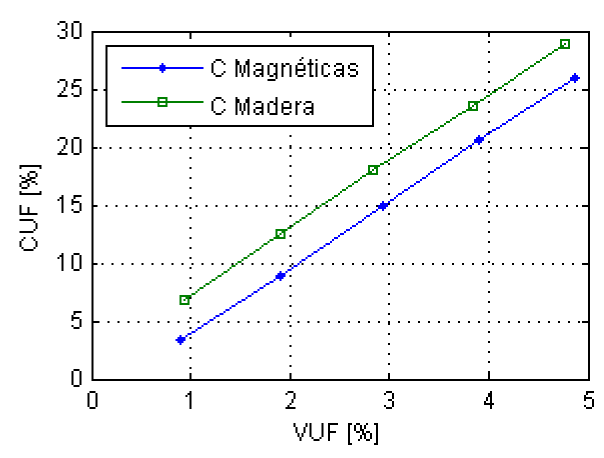
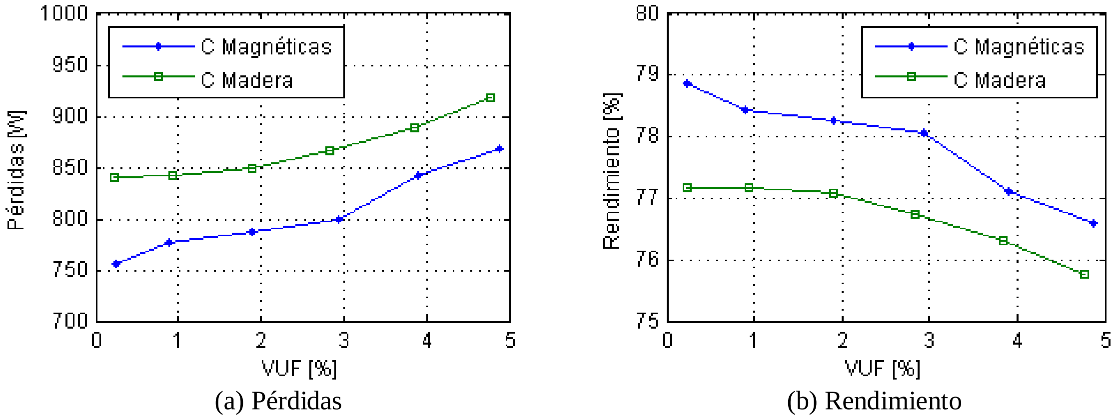


Fig. 5 Desequilibrio de corriente en función del desequilibrio de tensión

En la figura 5 se puede ver que el desequilibrio de corrientes crece de forma prácticamente lineal con el desequilibrio de tensión en ambos casos, sin embargo este incremento es más marcado en el MI con cuñas de madera. Para un desequilibrio de tensión de aproximadamente VUF=2% el desequilibrio de corriente es CUF=10% para el caso de cuñas magnéticas y CUF=13,6% para el caso de cuñas de madera.

4.2 Pérdidas y rendimiento del MI en función del desequilibrio de tensión

El desequilibrio en las corrientes conduce al incremento en las pérdidas del MI. La figura 6 (a) muestra el comportamiento de las pérdidas y su efecto en el rendimiento (figura 6 (b)) cuando el MI opera a plena carga para diferentes niveles de desequilibrio de tensión.



(a) Pérdidas (b) Rendimiento

Fig. 6 Pérdidas y rendimiento del MI para diferentes condiciones de desequilibrio de tensión y operando a plena carga

En la figura 6 (a) se ve que las pérdidas de ambos MI crece considerablemente con el nivel de desequilibrio de tensión. Las pérdidas en el MI con cuñas de madera operando a plena carga crecen 80 [W], desde 840 [W] en condiciones ideales a 920 [W] cuando VUF=5%. El incremento de pérdidas es más marcado en el MI con las cuñas magnéticas, a plena carga y en condiciones ideales de suministro las pérdidas son 760 [W] y crecen a 870 [W] si VUF=5% (+110[W]).

Es posible notar que las cuñas magnéticas permiten reducir las pérdidas del MI en un valor cercano al 10% (80[W]) en condiciones ideales de suministro respecto del MI con cuñas de madera. Sin embargo, esta diferencia se reduce al 5,5% (50[W]) cuando el VUF=5%.

El incremento en las pérdidas se manifiesta como una reducción en el rendimiento del MI. En la figura 6(b) se ve que el desequilibrio de tensión reduce el rendimiento de ambos MI, sin embargo la reducción es más marcada con la utilización de las cuñas magnéticas.

5 CONCLUSIONES

En el trabajo se presentaron los resultados preliminares del estudio de los efectos de las cuñas magnéticas en el desempeño de MI de baja potencia. Se puede observar que cuando la alimentación es sinusoidal y equilibrada el uso de cuñas magnéticas en el estátor del MI presenta grandes ventajas incluso en MI de baja potencia. Entre las ventajas es posible destacar la reducción en las corrientes eficaces de línea para cualquier condición de carga, ligero aumento en el factor de potencia del MI, especialmente con baja carga, reducción de las pérdidas del MI en todo el rango de funcionamiento e incremento en el rendimiento de entre 1,5-2% en todo el rango de operación normal de un MI.

Cuando el MI opera con tensiones desequilibradas, el uso de las cuñas magnéticas también presenta ventajas debido a que, si bien los efectos no son tan marcados como con alimentación ideal, las pérdidas son menores que cuando se utilizan cuñas de madera. En este sentido, el rendimiento del MI con cuñas magnéticas es mayor que el medido en el MI con cuñas de madera para cualquier condición de desequilibrio de tensión.

Sin embargo, como desventaja del uso de cuñas magnéticas se observa un mayor desequilibrio de corrientes en condiciones ideales de suministro.

Por último, se recomienda realizar mayores estudios para conocer el comportamiento de las cuñas magnéticas frente a otros problemas de calidad de energía en el suministro y las posibles ventajas en el ahorro de energía del MI.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Saidur, “A review on electrical motors energy use and energy savings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 877-898. Apr. 2010.

[2] F. Begner, C. Verucchi, J.Santellán, y C. Ruschetti, “Rebobinado de estatores de máquinas de inducción para ahorrar energía” in *XV Encuentro Iberoamericano de Cigré* (XV ERIAC) Foz de Iguazú, Brasil May. 2013.

[3] C. Verucchi, C. Ruschetti y G. Kazlauskas “Ventajas económicas y energéticas en accionamientos con motores de alta eficiencia”. *Ingeniería Eléctrica*, vol. 279, pp. 100-110. 2013.

[4] A. Berset and M. Ogara, “Sistemas accionados por motores eléctricos en observación”, Saber Como, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), pp. 3. Feb. 2010.

[5] I. Peter, "Induction motors with squirrel cage rotor, with IE2 efficiency level, up to 18.5 kW. methods for increasing the efficiency," 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012), pp. 550-556.2012.

[6] L. Alberti, N. Bianchi, A. Boglietti, and A. Cavagnino, “Core Axial Lengthening as Effective Solution to Improve the Induction Motor Efficiency Classes”, *IEEE Trans. on Industry Applications*. vol.50, no.1, pp.218,225, Jan.-Feb. 2014.

[7] H. Magaldi, M. De Luca, C. Carpio, A. Baragatti, C. Burgos and H. Sierralta “Sustitución de motor de eficiencia convencional por motor de alta eficiencia en industria textil”, *International Copper Association Latin America*, 2012.

[8] G. Madescu, M. Greconici, M. Biriescu and M. Mot “Effects of stator slot magnetic wedges on the induction motor performances”, in *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment* (OPTIM) pp. 489-492. 2012.

[9] Y. Anazawa, A. Kaga, H Akagami, S. and M. Makino, “Prevention of harmonic torques in squirrel cage induction motors by means of soft ferrite magnetic wedges”, *IEEE Trans. on Magnetics* Vol. 18 , pp. 1550 – 1552. 1982.

[10] J. Kappatou, C. Gyftakis, and A. Safacas, “A study of the effects of the stator slots wedges material on the behavior of an induction machine”, *18th International Conference on Electrical Machines* (ICEM 2008). pp. 1-6 , 2008.

[11] K. Gyftakis, P. Panagiotou, J. Kappatou, “The influence of semi-magnetic wedges on the electromagnetic variables and the harmonic content in induction motors”, XX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2012), pp.1469,1474, 2-5 Sept. 2012.

[12] M. Skalka, C. Ondrusek, J. Kurfurst, R. Cipin, “Harmonic reduction in induction machine using slot wedges optimization” International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2012) pp.1252,1255, 20-22 June 2012.

[13] S. Wang, Z. Zhao, L. Yuan, B. Wang, "Investigation and analysis of the influence of magnetic wedges on high voltage motors performance", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2008) pp.1,6, 3-5 Sept. 2008.
[14] Y. Takeda, T. Yagisawa, A. Suyama and M. Yamamoto, "Application of magnetic wedges to large motors" Magnetics, vol. 20, pp. 1780-1782. 1984.
[15] H. Mikami, K. Ide, K. Arai, M. Takahashi, and K. Kajiwara, "Dynamic harmonic field analysis of a cage type induction motor when magnetic slot wedges are applied", IEEE Trans. on Energy Conversión, vol. 12, pp. 337-343, 1997.
[16] R. Curiac and H. Li, "Improvements in energy efficiency of induction motors by the use of magnetic wedges", 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC 2011). Industry Applications Society, pp. 1-6, 2011.
[17] D. Hernandez and T. Gaerke, "The Temperature Impact of Magnetic Wedges on TEFC Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications. vol.49, no.3, pp.1228,1233, May-June 2013.
[18] A. Bonelli, A. Aoki, M. Teixeira, A. Langner, W. Souza, F. Filipini and R. Nehls, "Panorama do Impacto da Qualidade da Energia Elétrica Aplicada aos Motores das Indústrias do Estado do Estado do Paraná", in *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos* (SBSE 2012). Goiânia, Brasil. 2012.
[19] ANSI-NEMA Standard MG1-2003 Motors and Generators, National Electrical Manufacturers Association 2003, revisión 1–2004.
[20] P. Donolo, G. Bossio and C. De Angelo, "Analysis of Voltage Unbalance Effects on Induction Motors with Open and Closed Slot" Energy Conversion and Management, Elsevier Editorial System, vol. 52, no. 5, pp. 2024-2030, 2011.
[21] P. Donolo, G. Bossio and C. de Angelo, "Demérito en motores de inducción por armónicos y desequilibrio de tensión" XIV Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (XIV ERIAC). Ciudad del Este, Paraguay. Mayo 2011.
[22] R. Dugan, M. McGranaghan and H. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", Mc Graw Hill. New York 1996.
[23] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance". *IEEE Power Engineering Review*. Number 5 Volume 21. Mayo 2001.